



発電機器耐熱鋼のクリープ破断強度改善に関する研究

著者	山田 政之
号	1487
発行年	1993
URL	http://hdl.handle.net/10097/10294

氏 名	山 田 政 之
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学 位 授 与 年 月 日	平 成 6 年 3 月 16 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 5 条 第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 52 年 3 月 東北大学大学院工学研究科金属材料工学専攻 前期課程修了
学 位 論 文 題 目	発電機器用耐熱鋼のクリープ破断強度改善に 関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 及川 洪 東北大学教授 丸山 公一 東北大学教授 石田 清仁

論 文 内 容 要 旨

第1章「緒言」においては、本研究の背景として、まずオイルショック以降の石油代替エネルギー開発の現状を述べた。その中で、石油と同様に有限ではあるがクリーンなエネルギーの代表として期待されている天然ガスを利用したコンバインドサイクル発電（ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせた高効率発電方式）や燃料電池発電（都市型の分散発電システムで、無公害、低騒音発電方式）、および無尽蔵の埋蔵量を有する石炭を利用した高性能大容量石炭火力発電の開発の必要性を述べた。これらの発電においては、それぞれエネルギー枯渇の課題や、地球環境汚染の課題もクローズアップしてきており、発電機器の一層の高効率化、高性能化が指向されてきている。そのため、必然的に機器が高温化、高圧化するとともにプラント規模が大容量化するので、従来よりも非常に過酷な環境で使用できる材料を開発・実用化することがエネルギーを有効活用する高性能機器の実現のために極めて重要なポイントである。そこで、例えばコンバインドサイクル発電における高圧一体型蒸気タービン用ロータ（低合金耐熱鋼）、高性能大容量石炭火力発電用高圧（高中圧）ロータ、ブレード、ケーシング（いずれも高Cr耐熱鋼）および燃料電池発電燃料改質装置用改質管（オーステナイト系耐熱鋼）等について、現用材の延・靱性や良好な製造性を確保しつつ、クリープ破断強度の改善を図ることが望まれている。

第2章「研究の目的と内容」においては、第1章で例示した耐熱鋼について、それぞれ現状と将来に向けての技術課題と本論文で取扱う研究目的を整理した。まず、コンバインドサイクル発電の

蒸気タービンは中小容量（出力約300MW以下）であり、省スペース化や起動性能の改善のために高圧タービンと低圧タービンを分けない高低圧一体型の要求が強く、そのためには、その一体型蒸気タービンを構成するロータの高圧部位においては高温蒸気環境に耐え得る良好なクリープ破断強度、さらに、低圧部位においてはロータに装着される長翼の遠心力に耐えられる良好な耐力と靱性が求められる。本研究ではこの目的に合致するような高低圧一体型タービンロータ材について検討した。次に、大容量高性能石炭火力発電の蒸気タービンは、蒸気の高温・高圧化に伴って、よりクリープ破断強度の優れた耐熱鋼で構成する必要があるが、本研究においては、従来の蒸気条件（566℃/17MPaあるいは538℃/24MPa）に対して、より高圧化した条件（566℃/31MPa）での使用を可能にするタービンケーシング材、およびさらに高温化した条件（593℃）での使用を可能にするロータ材、ブレード材、ケーシング材の開発を行った。また、燃料電池発電の商用化を促進させるためにはプラント全体の製造コスト低減が必須であり、改質管材料についても、設計裕度のあるクリープ破断強度を確保するとともに素材コスト低減が強く望まれており、その要求を満たす改質管材料の開発を行った。以上に示すいずれの耐熱鋼も、より過酷な環境に適合し得るように、化学成分や熱処理条件の最適化を図る必要が有るが、それとともに大形構造物としての良好な製造性を確保しなければならず、合わせて製造条件の変更や最適化の検討も行った。

第3章「低合金耐熱鋼のクリープ破断強度および靱性改善」においては、まず最初に、最長660mm（蒸気タービン出力100MW以下）までの最終段翼の装着が可能な第一世代型高低圧一体ロータ材を開発した。本ロータ材は現用の高圧（高中圧）ロータ材である1CrMoV鋼をベース組成とし、1%Ni、0.03%Nbの複合添加を行うとともに、ロータ高圧部と低圧部にそれぞれ最適な熱処理条件を同時に付与（傾斜熱処理法）することによって、高圧部において1CrMoV鋼レベルの良好なクリープ破断強度、低圧部においては0.02%耐力が約600MPa、破面遷移温度（FATT）が50℃以下を達成したものである。

次に、より大出力（300MW以下）向けの最長850mmまでの最終段翼の装着が可能な第二世代型高低圧一体ロータ材を開発した。このロータ材は、低圧部においてより優れた0.02%耐力と靱性が必要であり、低合金鋼の範囲内で合金元素の効果を広範囲に調べ、2.25Cr-1.7Ni-1.1Mo-0.2V-0.2W-0.015Nb鋼を選定した。成分の改良に加えて傾斜熱処理法を適用し、高圧部においては1CrMoV鋼レベルの良好なクリープ破断強度、低圧部においては0.02%耐力約660MPa、FATT 30℃以下を達成した。

第4章「高Cr耐熱鋼のクリープ破断強度改善」においては、まず最初に、蒸気条件が従来（566℃/17MPaあるいは538℃/24MPa）よりも高温化した593℃の蒸気タービン用ロータに適している、優れたクリープ破断強度を有する改良型12Cr鋼ロータ材（10.5Cr-1Mo-0.2V-0.75Ni-0.07Nb-0.05N-1W鋼）を開発した。現用12Cr鋼ロータ材に比較し、W1%添加、C低減（0.18%→0.14%）、Ni増量（0.30%→0.75%）が成分上の特徴である。延・靱性を低下させずに593℃、10万hクリープ破断強度は約130MPa（現用12Cr鋼ロータ材は約80MPa）を達成できた。次に、やはり蒸気条件が593℃の蒸気タービン用ブレードに適している、優れたクリープ破断強度を有する改良型12Cr鋼ブレード材（11.5Cr-1Mo-0.2V-0.75Ni-0.20Nb-0.05N-1.2W鋼）を開発した。ロータ材の改良の場合と同様にW添加（1.2%）を行うとともに、現用12Cr鋼ブレード材に比較しNb低減（0.45%

→0.20%), 低Si化 (0.45%→0.1%以下) を図ったこと, および熱処理条件の最適化を図り焼入温度を上昇 (1090℃→1120℃) させたことが特徴である。また, 低Si化に伴って溶解・精練法の変更と最適化を図りAl脱酸とエレクトロスラグ再溶解法を適用することとした (従来はSi脱酸と真空アーク再溶解法)。このように成分, 熱処理, 製造プロセスの改善をバランス良く組み合わせることにより, 延・靱性をむしろ改善するとともに, 593℃, 10万hクリープ破断強度は約150MPa (現用12Cr鋼ブレード材は約110MPa) を達成できた。

第5章「高Cr耐熱鋳鋼のクリープ破断強度改善」においては, まず最初に, 従来の蒸気条件 (566℃/17MPa あるいは538℃/24MPa) よりも更に高圧化した条件 (566℃/31MPa) の蒸気タービン用ケーシングに適している12Cr鋳鋼ケーシング材 (10.1Cr-1Mo-0.2V-0.5Ni-0.1Nb-0.05N 鋳鋼) を開発した。この鋳鋼材は, 従来クリープ破断強度をそれほど必要としない小物部品に適用実績のある材料であったが, 本研究においてはクリープ破断強度と延・靱性のバランスやデルタフェライトの生成を抑制する観点から, Nb量, Cr当量の最適化 (0.1%Nb, Cr当量≤9), 熱処理条件の最適化 (調質前高温焼鈍工程と2段焼戻しの適用) を図ることにより566℃, 10万hクリープ破断強度は約140MPa (現用1CrMoV鋳鋼ケーシング材は約90MPa) を達成できた。

さらに, 蒸気条件がより高温化した593℃蒸気タービン用のケーシングに適している, より優れたクリープ破断強度を有する改良型12Crケーシング鋳鋼材 (10.1Cr-1Mo-0.2V-1Ni-0.1Nb-0.05N-0.8W鋼) を開発した。成分改良の基本的な考え方は, ロータ材, ブレード材と同様なWの最適添加と, 12Cr鋳鋼ケーシング材の反映であるCr当量の上限規定である。このような改良を行うことにより, 593℃, 10万hクリープ破断強度は約120MPa (現用12Cr鋳鋼材は約85MPa) を達成できた。また, 12Cr鋳鋼ケーシング材はCrを約10%含有した自硬性の高いマルテンサイト系鋼であるとともに強力な炭窒化物形成元素であるNbを含むことから, 大形ケーシングの製造過程において砂落としや押湯切断時の割れ, 溶接施工時の溶接割れ, 鋳造欠陥発生, 材料特性の不均一等の可能性が懸念されるため, 各種熱的取扱いに関する基礎試験を経て, 実機規模モデルケーシングの試作と製造性検証を実施し, 大形溶接構造物としての製造技術を確立した。

第6章「オーステナイト系耐熱鋼のクリープ破断強度改善」においては, 低コストかつクリープ破断強度に優れた燃料電池改質管用耐熱鋳鋼 (0.5C-23/25Cr-20/23Ni-0.7Nb-0.2/0.4Ti-0.2/0.4Zr 鋳鋼) を開発した。従来, クリープ破断強度の観点から, 約900℃以下においてはHK40材 (0.4C-25Cr-20Ni 鋳鋼), 約1000℃以上ではHP材 (0.5C-25Cr-35Ni 鋳鋼) やその改良材 (0.5C-25Cr-35Ni-Nb 鋳鋼, 0.5C-25Cr-35Ni-Nb-Ti 鋳鋼) が使用されているが, 経済的で, かつ1000~1050℃におけるクリープ破断強度が改良HP材並みに優れた耐熱鋳鋼が必要とされていた。そのため, 高コスト元素であるNiの含有量を低く抑えるとともに, 強化元素の微量添加によるクリープ破断強度の向上を意図し, Nb, Ti, Zrの複合添加が極めて有効であることを見出した。Nb, Ti, Zrの最適添加量を評価するとともに, 組織面からクリープ破断強度の向上要因を検討し, 共晶炭化物ネットワークサイズの微細化と界面微細析出物の存在および微細MC型炭化物の良好な高温安定性が強化に大きく効いていることを明らかにした。

第7章「実機への適用」では, 以上の各章において開発した低合金耐熱鋼, 高Cr耐熱鋼, オース

テナイト系耐熱鋼の，現状での実機適用状況をまとめた。

第8章「結言」では，以上の研究結果を総括し，高効率発電機器への材料面からの寄与を明らかにするとともに，実用鋼の材料開発に必要な基本的な指針を整理した。

審 査 結 果 の 要 旨

エネルギー枯渇や地球環境汚染の観点から、天然ガスを利用したコンバインドサイクル発電や燃料電池発電、また石炭を利用する高性能大容量火力発電の開発の必要性が指摘されている。これらの発電においては発電機器の高効率化、高性能化のために機器の高温・高圧化、プラントの大容量化が求められ、従来よりも過酷な環境で使用できる材料の開発が必要である。

本論文は各種発電機器で求められている従来鋼よりも高温クリープ特性に優れ、なおかつ従来鋼並みの常温機械特性を有する耐熱鋼を開発・実用化した経緯をまとめたもので、全編8章よりなる。

第1章は緒言であり、本研究の背景を述べている。

第2章は本研究の目的とその内容の概略であり、この研究で対象として選んだ高低圧一体型蒸気タービン、超臨界蒸気タービン、燃料電池発電用改質管に要求される性能を分析し、これに関する既往の研究を調査し、新材料開発のためには成分調整のみではなく、製造工程、熱処理条件なども組合せた総合的な検討が必要であることを述べている。

第3章では大出力高低圧一体型蒸気タービン用ロータ材に関する研究について述べている。このロータ材としては高圧（高温）部は耐クリープ性が、また低温（低圧）部は良好な強度・靱性が求められるが、低CrMoV鋼にNi, W, Nbを複合添加し、傾斜熱処理を適用することにより、これらの要求を同時に満たす新鋼種を開発し、850mmの最終段翼を装着可能とした。

第4章では超臨界蒸気タービン用展伸材に関する研究について述べている。この蒸気条件の下では従来の亜臨界蒸気条件用耐熱鋼よりも一段とクリープ特性の優れた材料が求められるが、現用12%Cr鋼にW添加, Ni増量, C, Si, Nb低減などの化学組成変更を行うと共に、溶解・精練法の変更、熱処理の最適化なども組み合わせることにより、現用12%Cr鋼以上の延性・靱性を保ったまま593℃10万時間クリープ破断強度150MPaを示す新鋼種を開発した。

第5章では超臨界蒸気タービン用 casting 材に関する研究について述べている。この条件で用いられるケーシング材としては肉厚に関係なく casting のままで十分な耐クリープ性を有することが求められるが、現用12%Cr casting 鋼材にNb, W添加, Cr当量の上限規定などの組成改良を行い、かつ調質前高温焼鈍工程と2段焼戻しなどの熱処理を施すことによって、593℃10万時間クリープ破断強度120MPaを示し、かつ製造性に優れた新鋼種を開発した。

第6章では燃料電池改質管用耐熱鋼に関する研究について述べている。従来この目的にはオーステナイト系25Cr-35Ni casting 鋼が使用されていたが、各構成元素の作用を組織学的、強度学的に検討した結果に基づいて、Ni含有量を大幅に低減し、Nb, Ti, Zrを複合添加することによって、低価格で1000℃以上におけるクリープ破断強度の優れた新鋼種を開発した。

第7章では第3章～第6章で述べた新鋼種の実機への適用状況をまとめて述べており、これら新鋼種は実用化に十分耐えることを実証している。

第8章は結言であり、以上の研究結果を総括し、実用鋼の材料開発に必要な基本的指針を整理し、高効率発電機器への材料面からの寄与を明らかにした。

以上要するに本論文は、他の諸特性を低下させずにクリープ破断強度を向上させるための基本指

針を明らかとし、いくつかの発電機器用耐熱鋼の開発・実用化を行ったもので、金属材料学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。